

并联型有源电力滤波器谐波电流零逼近控制策略

谭光慧, 纪延超

(哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 给出了基于谐波电流零逼近的有源电力滤波器新型控制策略。采用检测电源电流的控制方式, 构成了闭环控制系统。利用瞬时无功理论计算出电源谐波电流, 并直接进行滞环比较, 以控制主电路开关器件的通断, 从而使电源谐波电流逼近于零, 达到谐波抑制的效果。仿真结果表明, 该方法可准确跟踪负载谐波电流, 使电源电流趋于正弦, 原理清晰, 控制简单, 可实现动态补偿。

关键词: 有源电力滤波器; 谐波抑制; 滞环控制; 瞬时无功理论

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)14-0061-04

0 引言

随着电力电子装置的广泛应用, 电网的无功功率及谐波电流的污染问题日益严重。因此, 对电网的谐波及无功进行有效治理就成为迫切需要解决的问题。上世纪 70 年代提出的有源电力滤波器 (Active Power Filter, 简称 APF) 技术目前已成为电力系统中谐波抑制和无功补偿的有效手段^[1], 并在不断完善和发展之中。

在有源电力滤波器的各种类型中, 占主导地位的是并联型有源电力滤波器, 其控制策略大多以上世纪 80 年代初 H. Akagi 等人提出的瞬时无功理论为基础^[2], 以补偿电流为控制对象, 检测出负载电流中谐波 (或无功) 分量, 将其作为补偿电流的给定值, 并与由电流互感器检测出的实际补偿电流相减, 两者的差值通过 PWM 控制回路产生相应的 PWM 波, 控制有源电力滤波器中相应的开关管的导通及截止, 从而达到补偿谐波 (或无功) 的目的。

有源电力滤波器的作用主要是补偿谐波, 最终使电源电流成为正弦波。而上述方法是一个开环过程, 由于未对期望的电源电流实现闭环跟踪控制, 测量和计算误差得不到补偿, 影响了其补偿性能的提高。基于此, 可考虑采用检测电源电流方式, 而不检测负载电流, 用指令电流运算电路求出电源电流中的谐波, 反极性后作为补偿电流的给定值对有源电力滤波器进行控制^[3]。

本文提出一种基于谐波电流零逼近的有源电力滤波器新型控制方法。该方法只需检测电源电流, 利用瞬时无功理论计算出电源电流中的谐波电流, 并直接进行滞环比较, 以控制主电路开关器件的通断, 从而使电源谐波电流逼近于零, 有效的抑制谐

波。

1 谐波电流零逼近控制原理

如图 1 所示为谐波电流零逼近控制原理图。从图中可以看出, 该方法采用检测电源电流 i_s 的控制方式, 通过指令电流运算电路计算出电源电流中的谐波成分 i_{sh} , 然后将 i_{sh} 送入电流滞环控制器产生 PWM 控制信号, 经驱动电路后控制主电路中各开关管的导通与关断, 从而使得主电路产生与负载谐波电流反极性的补偿电流。由于电源谐波电流 i_{sh} 直接进行滞环控制 (相当于 i_{sh} 与零的差值进行滞环比较控制), 而滞环控制的目标就是使滞环输入量趋近于零, 因而可使得 i_{sh} 在控制过程中逼近于零, 这就是本文所提出的“谐波电流零逼近”这一名称的由来。电源电流 i_s 包括基波正弦电流和谐波电流两部分, 当谐波电流 i_{sh} 逼近于零时, 电源电流 i_s 只有基波正弦成分, 从而达到了谐波抑制的效果。

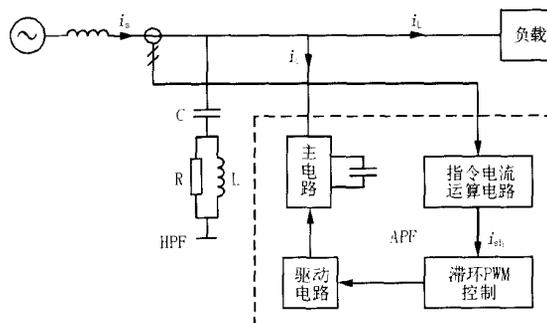


图 1 谐波电流零逼近控制原理图

Fig 1 Control principle of harmonics current approaching to zero

主电路采用常用的电压型 PWM 变流器。整个系统需要两个电流互感器用于检测任意两相电源电

流,另外一相电流可通过计算得出(三相三线制系统三相电源电流之和为零),需要一个电压互感器用于检测直流侧电容电压参与 P 控制,使直流侧电容电压稳定,还需要一个电压互感器测量系统电压以进行锁相,而因为不必检测三相补偿电流,可以省去三个电流互感器,使整个电路更加简化。电路还采用了有源电力滤波器与 LC 高通滤波器并联的方式,两者均与谐波源并联接入电网,共同承担补偿谐波的任务,其中高通滤波器一方面用于消除补偿电流中因主电路中器件通断而引起的谐波,另一方面它可滤除对象中次数较高的谐波,从而对有源电力滤波器主电路中器件开关频率的要求可以有所降低。

有源电力滤波器的核心在于指令电流运算电路和电流跟踪控制电路。指令电流运算电路用于计算出电源电流 i_s 中谐波电流 i_{sh} ,由于瞬时无功理论在有源电力滤波器的谐波和无功电流实时检测方面有着突出的优点,因此这里采用瞬时无功理论(i_p 、 i_q 运算方式)计算谐波电流,如图 2 所示。电流跟踪控制电路的作用是根据实际电流和期望值的相互关系,得出控制补偿电流发生电路中主电路各个器件通断的 PWM 信号,以保证输出的补偿电流能跟踪负载的谐波电流。由于并联型有源电力滤波器要求良好的实时性,可采用滞环 PWM 控制的瞬时值比较方式,把电源谐波电流 i_{sh} 作为滞环比较器的输入,通过滞环比较器产生控制主电路中开关通断的

PWM 信号,这种方式硬件电路简单,实时性好,属于闭环控制方式,而考虑到滞环比较器的瞬时值比较方式在环宽固定时开关频率可能过高这一缺点,这里采用定时控制的瞬时值比较方式,可避免器件开关频率过高的情况发生。

2 闭环控制

2.1 电压环

电压型 PWM 变流器的直流侧接有大电容,在正常工作时,其电压基本保持不变,可看作电压源,在交流侧的输出电压为 PWM 波,而为了保持直流侧电压不变,需要对直流侧电压进行控制。对直流侧电压 U_c 的控制是由图 2 的谐波电流运算电路虚线框内的部分结合补偿电流发生电路实现的。图中, U_{c*} 是 U_c 的给定值, U_c 是 U_c 的反馈值,两者之差经 PI 调节器后得到调节信号 Δi_c ,它叠加到瞬时有功电流的直流分量 \bar{i}_p 上,经运算在指令信号 i_{sh}^* 中包含一定的基波有功电流,这就使得有源电力滤波器的补偿电流中包含一定的基波有功电流分量,从而使有源电力滤波器的直流侧与交流侧交换能量,将 U_c 调节到给定值,以实现直流侧电压的闭环控制。其中 PI 调节器的 P 参数是闭环调节成功和调节性能好坏的关键性指标,影响到整个系统谐波补偿的效果。

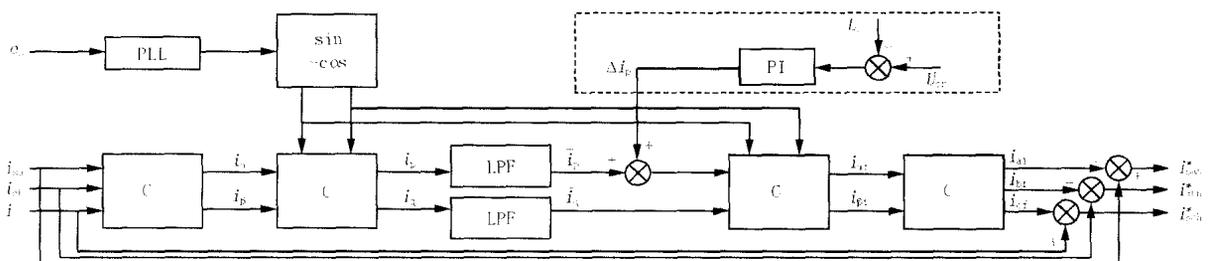


图 2 包括直流侧电压控制环节的谐波电流运算电路

Fig 2 Hamonics current calculation procedure including DC voltage control

2.2 电流环

如图 1 所示为检测电源电流的控制方式,由互感器测出电源电流后,经指令电流运算电路计算出谐波电流后,由电流滞环的 PWM 瞬时值控制方式产生控制开关管通断的 PWM 信号,以使变流器产生出所需的补偿电流,这样就构成了电流闭环控制系统。这种控制方式的电流环结构图如图 3 所示。

图 3 中, $G_z(s)$ 为以 i_{sh} 为输入、以 i_s 为输出时的传递函数,由于高通滤波器的存在,使得 $G_z(s)$ 不为

1, $G_1(s)$ 为指令电流运算电路的传递函数, $G_c(s)$ 为补偿电流发生器的传递函数,它可以看作一个时间常数很小的一阶惯性环节, $G(s)$ 是为改善补偿特性而加入的校正环节。这种闭环控制系统把产生谐振的传递函数 $G_z(s)$ 包括在闭环内,选择适当的校正环节 $G(s)$,就可抑制谐振,一般来说,为了获得良好的补偿特性, $G(s)$ 应有较大的放大倍数,以增大系统的开环增益。

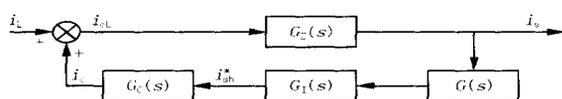


图 3 电流环结构图

Fig 3 Structure of current control loop

3 仿真结果

为了验证谐波电流零逼近有源电力滤波器闭环控制系统的有效性,本文在三相三线制系统下与检测负载电流的开环控制系统进行了仿真对比研究。仿真电路接上一个带 RL 负载的三相整流桥,接到对称的三相电源上,主电路采用电压型变流器结构,两种控制模式的仿真系统参数相同,如表 1 所示。

表 1 仿真中的系统参数

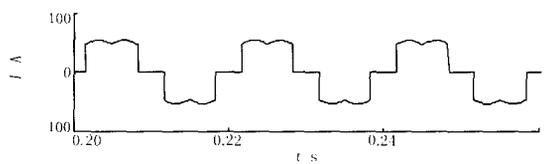
Tab 1 System data of simulation

系统仿真参数名称	参数值
相电压有效值 /V	220
电压频率 /Hz	50
开关频率 /Hz	20 k
连接电感 /mH	1
变流器直流侧电容 / μ F	1 100
变流器直流侧电压 /V	950
三相整流桥所接电阻 /	10
三相整流桥所接电感 /mH	1

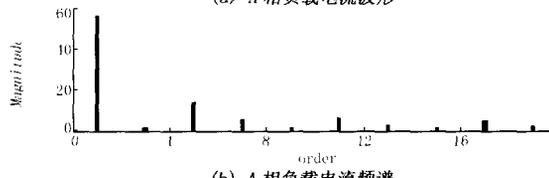
图 4(a)、(b)分别给出了 A 相负载电流的波形和频谱图。三相整流桥负载为电网中典型的谐波源,由图 4 可知,补偿前的电源电流畸变严重,含有较大的谐波电流成分 ($6n \pm 1$ 次)。

图 5 给出了检测负载电流的电流开环控制系统仿真结果,图 5(a)、(b)分别为补偿后的 A 相电源电流波形和频谱图。单独使用的并联型有源电力滤波器开环控制模式中,补偿电流能较好的跟踪指令电流,但会产生其工作频率附近的一些次数很高的谐波,因此要设置由电感、电阻和电容组成的高通滤波器 (HPF)。而由图 5 可知,频率很高的高次谐波得以滤除,但是 7 倍的基波频率处发生了谐振,使得负载电流中频率为 7 倍基波频率附近的谐波被放大后流入电网,有源电力滤波器补偿特性变差。这是开环控制方式的主要缺点。

图 6 给出了谐波电流零逼近闭环控制系统仿真结果,图 6(a)和 (b)分别为补偿后的 A 相电源电流波形和频谱图。由图 6 可见,该方法可有效的补偿谐波,使电源电流趋于正弦,克服了开环控制模式易发生谐振的问题,补偿精度高。



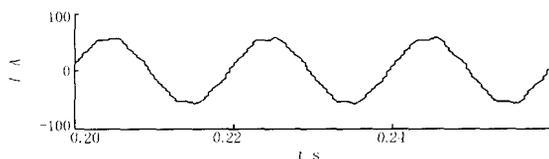
(a) A 相负载电流波形



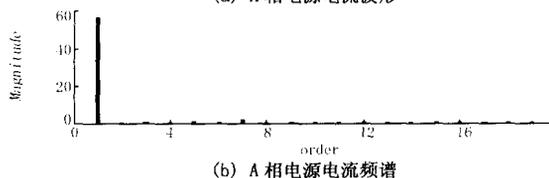
(b) A 相负载电流频谱

图 4 负载电流仿真波形和频谱图

Fig 4 Simulation waveform and spectrum of load current



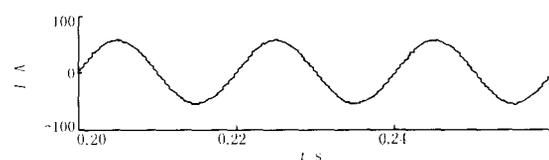
(a) A 相电源电流波形



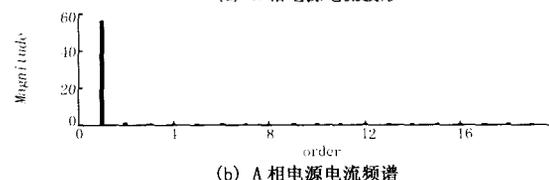
(b) A 相电源电流频谱

图 5 开环控制系统电源电流仿真波形和频谱

Fig 5 Simulation waveform and spectrum of source current under open-loop control system



(a) A 相电源电流波形



(b) A 相电源电流频谱

图 6 闭环控制系统电源电流仿真波形和频谱

Fig 6 Simulation waveform and spectrum of source current under close-loop control system

4 结论

本文所提出的基于谐波电流零逼近的有源电力滤波器新型控制策略采用检测电源电流的控制方式,构成了闭环控制系统,提高了补偿精度;由于无需与实际的补偿电流比较,而只是让电流的谐波电流与

零逼近,可以省去测量补偿电流的互感器,使电路大为简化;仿真结果也证明,该方法与检测负载电流运行方式相比,避免了谐振问题,可准确跟踪负载谐波电流,使电源电流趋于正弦,有效的治理电网谐波。

参考文献:

- [1] Akagi H. New Trends in Active Filters for Power Conditioning[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1996, 32(6): 1312-1322
- [2] Akagi H, et al Instantaneous Reactive Power Compensations Comprising Switching Devices without Energy Storage Components[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1984, 20(3): 625-630
- [3] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社, 1998

WANG Zhao-an, YANG Jun, LU Jin-jun Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 1998

- [4] 李建林,张仲超. 有源电力滤波器控制策略综述[J]. 电力建设, 2003, 24(6): 44-46
- LI Jian-lin, ZHANG Zhong-chao Summarization of Control Strategy on Active Power Filter[J]. Electric Power Construction, 2003, 24(6): 44-46

收稿日期: 2004-11-01; 修回日期: 2004-11-27

作者简介:

谭光慧(1979-),男,硕士研究生,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用; E-mail: gh_tan@163.com

纪延超(1962-),男,教授,博导,从事电力电子技术在电力系统中的应用、FACTS等研究工作。

A new control method for parallel active power filter based on harmonics current approaching to zero

TAN Guang-hui, JI Yan-chao

(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: This paper presents a new method of an active power filter on source harmonics current approaching to zero. Working on source current detecting control mode, a close-loop system is formed. The harmonic current can be obtained based on instantaneous reactive power theory, and the current hysteresis PWM controller is applied directly to control the main circuit, which can reach the conclusions that the source harmonics current approaches to zero and harmonic suppression is gained. Simulation results show that this method can track inverter accurately to make the source current sinusoidal and achieve dynamic compensation. The principle is clear and the control simple.

Key words: active power filter; harmonic suppression; hysteresis control; instantaneous reactive power theory

(上接第 5 页 continued from page 5)

- [29] Tan J C, Crossly P A, Hall I J, et al Intelligent Wide Area Back-up Protection and Its Role in Enhancing Transmission Network Reliability [J]. Proceedings of 7th DPSP. Amsterdam: 2004. 46-49.
- [30] Karlsson D, Ilar F, Crossley P A. System Protection Schemes in Power Networks: Existing Installations and Ideas for Future Developments [J]. Proceedings of 7th DPSP. Amsterdam: 2004. 450-453.

收稿日期: 2005-06-02

作者简介:

卢强(1936-),男,教授,博士生导师,中国科学院院士, IEEE Fellow. 研究方向为电力系统控制和非线性系统理论; E-mail: Luqiang@tsinghua.edu.cn

董新洲(1963-),男,教授, IEEE 高级会员,研究方向为电力系统继电保护。E-mail: xzdong@tsinghua.edu.cn

Protective relaying and electric power system collapse prevention

LU Qiang, DONG Xin-zhou

(State Key Laboratory of Electric Power System & Department of Electrical Engineering,

Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper focuses on the effect of protective relaying in power system in case of collapses. In view of collapse prevention, a series of requirements concerning protective relaying have been proposed. Based on the requirements, new research direction of protective relaying applied in collapse prevention is also discussed.

Key words: electric power system; collapse; collapse prevention; protective relaying